咸海生态危机：荒漠化趋势与生态恢复防控对策

何明珠[1]　高　鑫[2*]　赵振勇[2]　杨昊天[1]　黄　磊[1]　李新荣[1]　雷加强[2]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠试验研究站 兰州 730000

2 中国科学院新疆生态与地理研究所 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心 乌鲁木齐 830011

摘要　土地荒漠化是全球可持续发展面临的问题和挑战。中国政府提出将“丝绸之路经济带”建设与中亚的生态环境保护融于一体，打造中国-中亚命运共同体，推动“绿色丝绸之路”的可持续发展。然而，咸海生态危机引发水体大幅缩减，生物多样性丧失，以及土地盐渍化、沙化、盐尘等已成为“绿色丝绸之路”建设在中亚遇到的重大环境问题。文章在梳理咸海生态危机引发的土地荒漠化问题的基础上，科学分析了近30年来咸海地区沙化和盐渍化土地发展的趋势，探讨了阿姆河流域-咸海地区植被稳定性和承载力的空间分异性，提出基于多学科融合的沙化和盐渍化土地生态恢复的思路和防控对策。助力解决咸海生态危机及荒漠化问题是建设“绿色丝绸之路”的焦点之一，也是构建人类命运共同体和践行生态文明全球价值观的重要体现。

关键词　咸海，荒漠化，可持续发展，盐渍化，盐尘，植被承载力

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20201214001

可持续发展已成为全球共识。2015年9月联合国发展峰会通过的《变革我们的世界：2030年可持续发展议程》，开启了全球可持续发展的新纪元[1]。中国政府在积极落实联合国2030年可持续发展目标的同时，提出“共同建设‘绿色丝绸之路’”倡议，将“绿色丝绸之路”建设与中亚的环境建设融于一体，打造中国-中亚命运共同体，积极推动地区绿色可持续发展[2,3]。

咸海流域覆盖了中亚五国及阿富汗、伊朗7个国家在内的123万平方公里，地处亚欧大陆地理中心，是“一带一路”倡议辐射欧洲、非洲的核心枢纽[4]（图1）。然而，由于地处亚洲大陆干旱区内，区域生态环境十分脆弱，人口增长和水土资源的不合理利用，导致土地荒漠化、水土流失和环境污染等问题非常严重[5]。20世纪后半叶以来，随着咸海水体大

* 通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20030102、XDA20030103）
修改稿收到日期：2021年1月21日

幅萎缩，大面积的干旱湖底直接成为裸地、盐土或被盐壳覆盖，在风力作用下形成了多发性、高污染的盐尘暴和盐碱地，引发区域植被退化和土地盐渍化问题[6-8]；同时，该区域地下水位下降和气候干旱化导致植被退化、草地和农田沙化，加速形成新的沙漠带[4]。2017年7月，联合国秘书长古特雷斯考察咸海时指出，咸海干涸成为“20世纪最大的环境灾难”。目前，沙化和盐渍化等土地荒漠化问题是咸海生态危机亟待面对和解决的重要难题。本文拟通过分析阿姆河-咸海流域土地荒漠化发展趋势，并基于沙化和盐渍化土地生态恢复重建的技术和实践总结，提出咸海危机的生态恢复防控对策和展望。

1 咸海流域土地荒漠化问题

咸海，曾经是中亚第一大咸水湖、世界第四大内陆湖泊，面积将近7×10⁴ km²；中亚两大内流河锡尔河和阿姆河注入咸海，维持了咸海水域的稳定[7]。20世纪60年代开始，苏联在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦兴建重大引水工程，并将阿姆河和锡尔河水资源引至沙漠地区开垦农田，种植高耗水的棉花和其他农作物，农业丰产丰收的盛景背后是咸海的逐渐枯竭和系列生态环境问题[9-11]。

（1）水域缩减、水质下降、生物多样性下降。咸海面积由1986年的44 164 km²缩减到2017年的9 772 km²，减少了约78%[10]；其中，2015年南咸海的东部盆地已完全干涸。随水域面积减小，西咸海的溶解盐浓度高达150 g/L，是1960年水体盐浓度的15倍以上[7]。此外，水位下降引起水体生物多样性的丧失，曾经丰富的鳊鱼、鲤鱼和其他淡水鱼类大幅减少乃至消失。例如，西咸海中已无鱼类，仅有咸水虾和少量

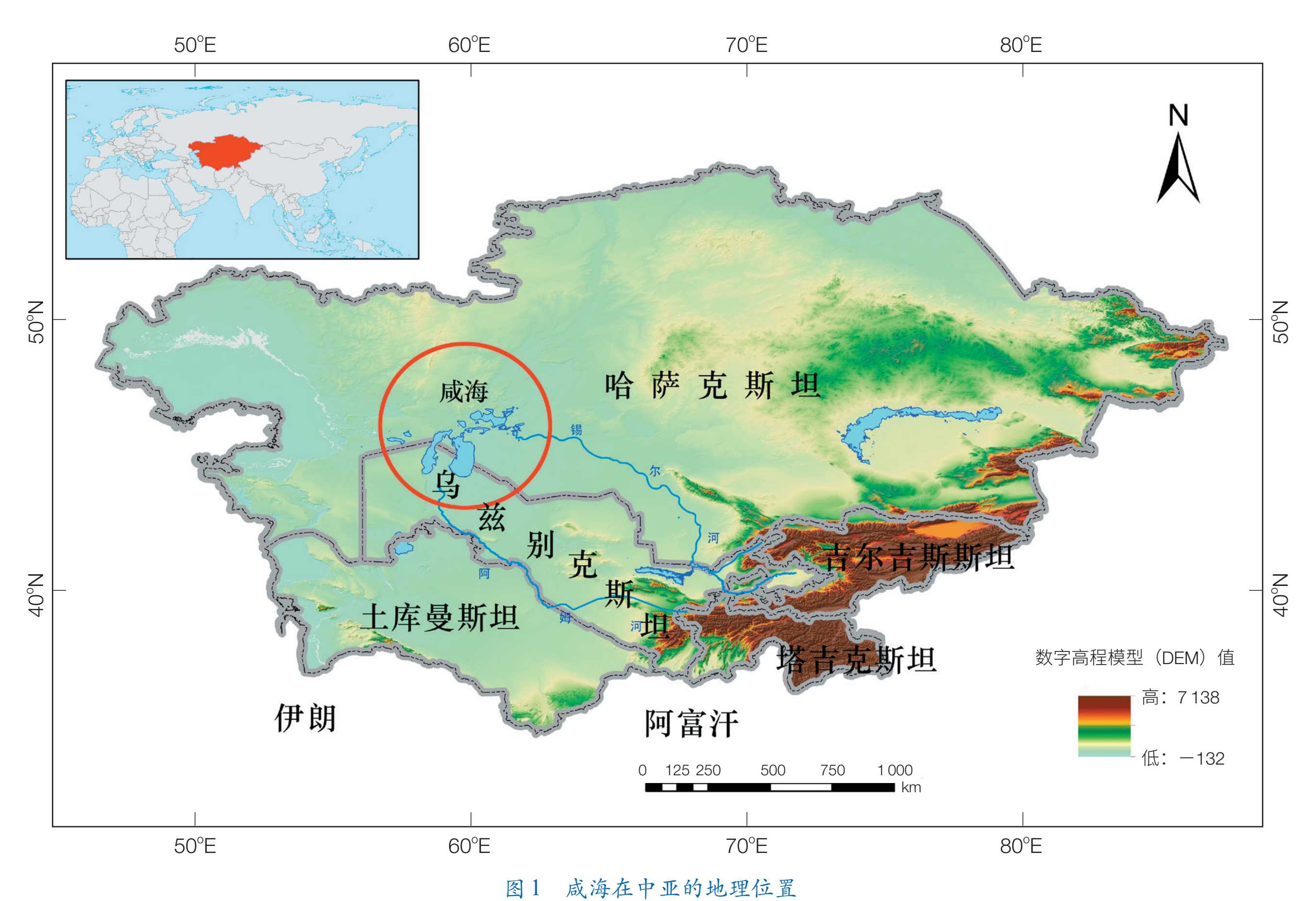


图1　咸海在中亚的地理位置

Figure 1　Location of Aral Sea in Central Asia

底栖动物生存[6]。

（2）盐碱荒漠化土地快速发展、土地质量下降。灌溉引起的农田盐渍化问题日益严重，尤其在阿姆河下游咸海附近的乌兹别克斯坦卡拉卡尔帕克斯坦自治共和国和布哈拉州等地，部分地方90%—94%的土地受到盐渍化侵害[12,13]。盐渍化成因包括外源输入和内源溶解表聚2个方面：① 外源输入主要来自于内陆河携带的盐分。据世界银行的调研报告，锡尔河和阿姆河携带的盐量从20世纪60年代的$5.5×10^7$—$6.0×10^7$ t增加到了20世纪90年代中期的$1.354×10^8$ t[14]。② 内源溶解表聚主要是灌溉溶解深层土壤盐分，通过毛细管作用在地表富集。据乌兹别克斯坦农业与水利部水利与水问题研究所测算，轻度、中度和重度盐碱化可分别导致20%—30%、40%—60%和80%以上棉花产量的损失[13-15]。

（3）干涸湖底盐分积累、盐尘频发且危害严重。咸海干涸湖底聚集着大量的有毒盐；据估计，咸海完全干涸后会形成寸草不生的盐漠，大约会产生100多亿吨盐。咸海盐尘在风力驱动下进入大气，形成长达数百公里的羽状尘埃流，对生态环境造成极大破坏（图2a和b）。盐尘的危害包括但不限于3个方面：① 人口健康（特别是妇女和儿童）。毗邻咸海的地区生存条件极度恶化，空气中长期悬浮盐尘颗粒，从而导致个别地方的婴儿死亡率高达8.2%；该地区妇女和儿童患呼吸道疾病和消化道疾病的概率也大幅上升，生活在乌兹别克斯坦西北部、咸海南岸的卡拉卡尔帕克斯坦共和国的100多万人健康状况受到影响[16]。② 土壤“健康”。盐尘活动作为一类重要的地表物质空间再分配的过程，可被视为一个“风源水汇”的双向流：一方面在风力驱动下以盐尘源的形式不断向大气输出颗粒物；另一方面又不断接收来自地表、地下径流的输送，成为盐分、泥沙及化学物质的汇[16]，加速了土壤次生盐碱化过程（图2c）。③ 生物“健康”。盐尘对植被的破坏包括机械打磨、化学腐蚀、生物脱水，并造成植物枯萎死亡（图2d）。在大风作用下盐碱沙尘暴会将沙尘和盐碱扩散到250 km外的农田和牧场，每年进入大气层的盐尘达$1.5×10^7$—$1.7×10^7$ t[17,18]。携带盐碱、沙尘和有害化学物质的沙尘暴已对农牧业生产和陆面生态系统产生严重危害。

（4）咸海局地气候干旱化、风沙活动加剧。随着咸海水体面积的减小，对局地气候的调节作用减弱，咸海地区干旱程度日趋加剧，空气湿度降低20%—25%；温差增大，夏季气温比过去升高了2℃，最高气温达45℃[5]。阿姆河三角洲地区的气候逐渐与周围的沙漠气候趋同，夏季高温少雨，冬季寒冷少雪

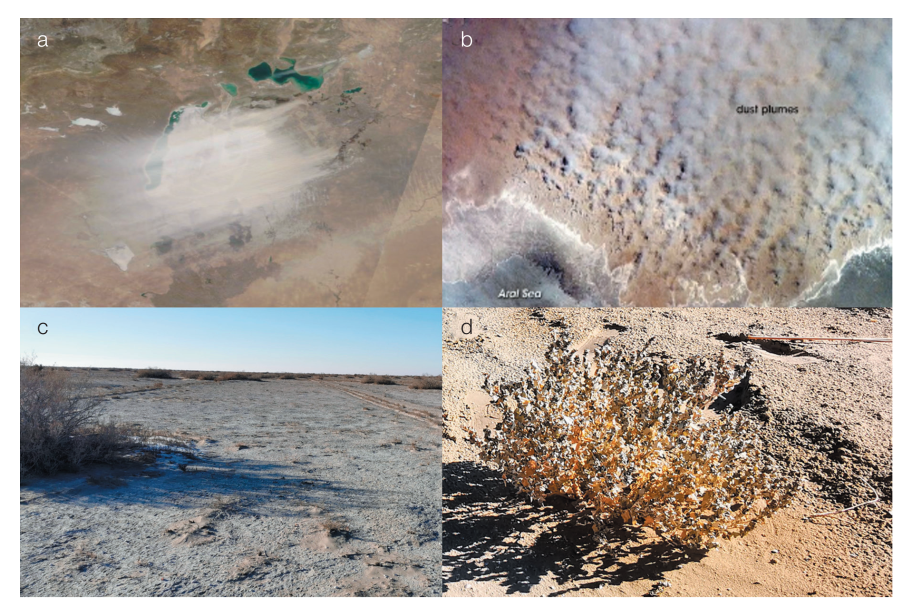


图2　咸海盐尘释放及危害

Figure 2　Salt dust emission and hazards

（a）和（b）羽状尘埃流（图片来源于美国国家航空航天局）；（c）盐尘加剧土壤次生盐碱化；（d）盐尘对植被的危害

(a) and (b) Dust plume, images from NASA; (c) Intensified soil salinization induced by salt dust; (d) Hazard of salt dust to vegetation

（图 3）。荒漠化土地扩张叠加气候干旱多风，导致沙尘暴和盐尘暴肆虐。2000—2016 年，咸海湖盆盐/沙尘活动一直比较活跃，平均发生次数达 15.3 次/年；最频繁的风暴出现在咸海北部地区，平均频率达到 36—84 天/年，而东部地区为 9—23 天/年[4,19]。咸海干涸湖底及其附近的荒漠地区已成为世界上最重要的尘源地之一[17, 20]。据不完全统计，“绿色丝绸之路”建设过程中的交通干线、电力网络、油气管网均受到盐尘灾害的威胁。咸海危机造成的社会经济损失已高达数百亿美元[21]。

2 荒漠化土地发展趋势与植被承载力

2.1 荒漠化土地发展趋势

为准确提取乌兹别克斯坦荒漠化土地信息，本文选取 Landsat TM 遥感影像，并进行波段合成（4、3、2 波段分别被赋予红、绿、蓝 3 种颜色，此波段组合能很好地反映植被生长状况和风成地表形态，使遥感图像目标物更加突出），以对 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年乌兹别克斯坦遥感影像进行解译。然后，基于荒漠化土地解译方法和地面验证点无人机航拍影像资料，建立了研究区域土地荒漠化目视解译标志和定量评价体系，具体包括沙化土地、盐渍化土地、沙漠、草地和其他 5 个一级分类，并将沙化土地分为流动沙丘、灌丛沙化和耕地沙化 3 个二级分类。进而，通过 160 个地面验证点与判读结果的对比验证发现，利用建立的解译标志进行人工判读的总体精度可以达到 93.79%。其中，轻度沙化判读精度为 91.67%，中度沙化为 100%，重度沙化为 100%，极重度沙化为 93.75%，其他土地类型为 92.37%，均显示了较高的判别精度。研究区域土地荒漠化的时空变异特征主要表现如下。

（1）土地荒漠化呈扩张趋势。自 20 世纪 90 年代以来，乌兹别克斯坦阿姆河流域至咸海地区的土地荒漠化呈显著增加趋势，1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年土地荒漠化（包括沙化和盐碱化土地）面积分别为 7.45×10⁴ km²、7.49×10⁴ km²、8.24×10⁴ km² 和 10.48×10⁴ km²（图 4），分别占乌兹别克斯坦国土面积的 16.86%、16.96%、18.65% 和 23.72%。其中，盐碱化土地从 1990 年的 1.05×10⁴ km² 发展到 2015 年的 2.64×10⁴ km²，增加了 1.52 倍；同期沙化土地面积从 7.03×10⁴ km² 扩

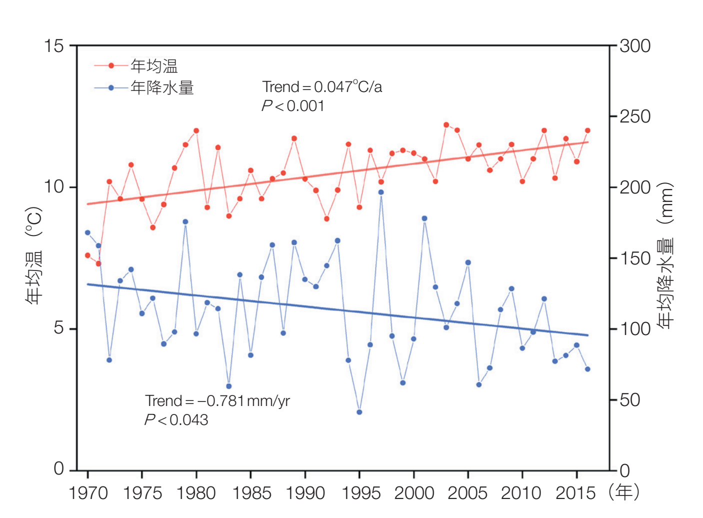


图 3 20 世纪 70 年代以来咸海地区温度、降水量变化趋势（以乌斯秋尔特高原为参考）
Figure 3 Changes of temperature and precipitation in Aral Sea region since 1970s (reference to Ustyurt Plateau)

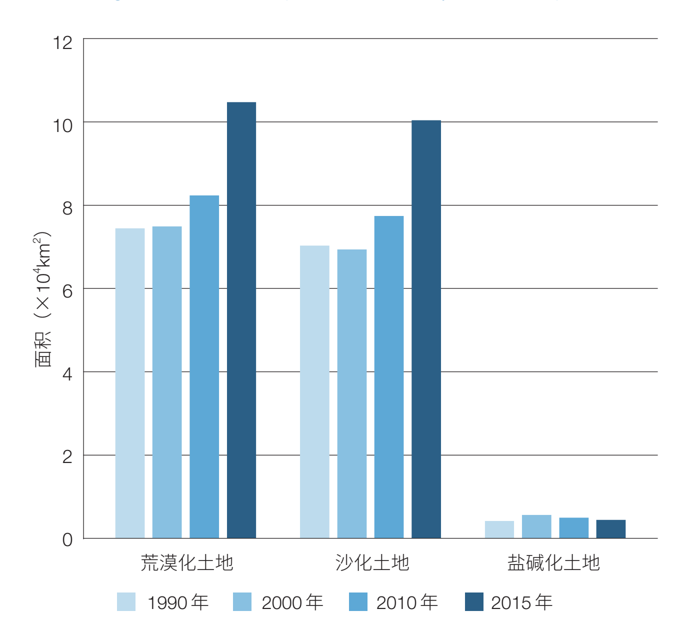


图 4 乌兹别克斯坦荒漠化土地面积变化趋势（1990—2015 年）
Figure 4 Development trends of desertified lands in Uzbekistan (from 1990 to 2015)

大到 10.04×10^4 km^2，增加了 0.43 倍。上述数据呈现出盐渍化增加速率高于沙化的趋势；沙化/盐渍化土地面积之比在上述 4 个阶段分别为 16.87、12.41、15.61 和 22.81。其中，盐渍化土地发生区域集中分布在咸海区域、盐/沙尘暴波及区域和部分灌溉农田等；部分区域也存在盐渍化和沙化问题叠加的现象，这给荒漠化土地的治理提出新的挑战。因此，分析咸海生态危机引发的荒漠化问题，需要在沙化治理的同时，高度重视盐渍化土地防控与生态治理。

（2）荒漠化程度呈现“三增一减”趋势。按照沙化土地退化程度等级（极重度、重度、中度和轻度沙化）划分和量化评价，1990—2015 年，土地退化等级呈现“三增一减”趋势，即：轻度、中度和重度沙化面积呈现显著增加趋势，尤其是 2010—2015 年轻度和中度沙化土地面积的增长速率显著增加（图 5）；而同期极重度沙化面积呈现波动下降趋势。进一步分析发现，农田沙化逐渐占主导。例如，2010—2015 年，耕地沙化面积从 1.05×10^4 km^2 增加为 3.18×10^4 km^2，5 年间面积增加了 2 倍。轻度、中度和重度沙化土地面积的迅速扩张，表明咸海流域土地沙化的总体态势呈现恶化趋势，而耕地沙化可能和水资源短缺导致的灌溉不足或弃耕等问题密切相关。

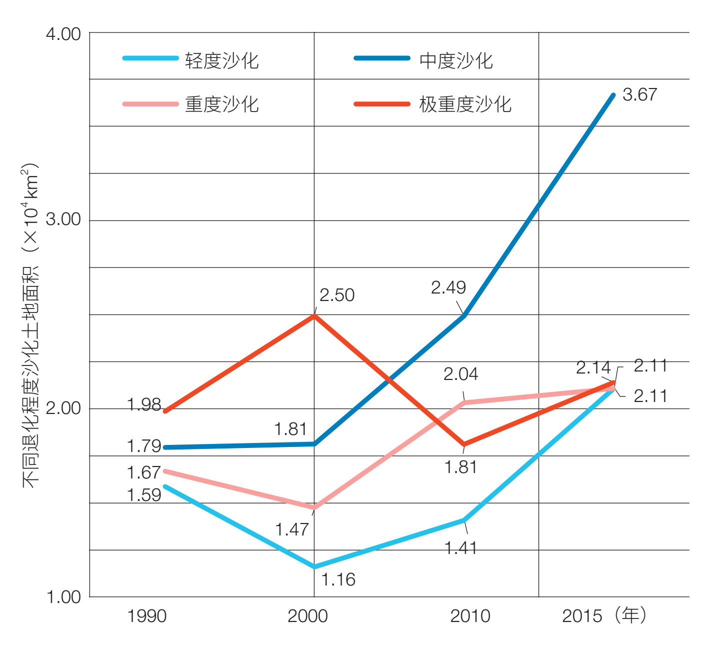


图 5 乌兹别克斯坦不同退化程度沙化土地面积变化趋势（1990—2015年）

Figure 5 Development trends of desertified land with different levels in Uzbekistan (from 1990 to 2015)

2.2 植被稳定性与承载力分析

基于荒漠化时空分布格局，从景观尺度对研究区域的植被稳定性及其承载力进行分析，综合面积-边缘指标（area-edge）、形状指标（shape）、核心面积指标（core area）、聚集度指标（aggregation）、对比度指标（contrast）和多样性指标（diversity）等 6 类景观指数，并选取不稳定性区域内变化明显的最大斑块指数（LPI）、斑块密度（PD）、独立核心斑块密度（DCAD）、总边缘对比度指数（TECI）和分离度指数（SPLIT）等 5 个景观指数作为衡量植被稳定性的关键指标，对阿姆河-咸海流域植被稳定性与承载力进行分析。

（1）植被稳定性土地面积呈下降趋势。通过对 2 个时期的植被稳定性面积的分析发现：1990—2010 年，阿姆河-咸海流域植被稳定和不稳定面积分别为 39.16×10^4 km^2 和 5.72×10^4 km^2，分别占国土面积的 87.2% 和 12.8%；2010—2015 年，稳定和不稳定地区分别为 37.34×10^4 和 7.55×10^4 km^2，分别占比国土总面积为 83.2% 和 16.8%；25 年间，植被不稳定土地面积增加了 1.82×10^4 km^2（表 1）。

（2）植被承载力下降且呈现显著空间异质性。参照李新荣等[23]提出的我国北方风沙危害区生态重建与恢复植被承载力的方法，以沙漠生态系统稳定植被-土壤系统的年蒸散与降水比值（ET/P=1.03）及相应的灌木（盖度 10%）、草本（盖度 40%）和隐花植物（盖度 60%）为基准，分析阿姆河流域-咸海区域 1990 年、2010 年 4 月和 10 月（分别代表雨季和旱季）的 ET/P 值空间分布特征，发现研究区域植被承载力呈现明显时空异质性（图 6）。① 从空间尺度上看，沿阿姆河流域下游的植被承载力较中游地区高。② 从时间尺度上看，1990 年 4 月阿姆河流域-咸海区

表 1　1990—2010 年和 2010—2015 年阿姆河-咸海流域稳定和不稳定面积变化

Table 1　Changes of stable and unstable areas in Amu Darya and Aral Sea basin from 1990 to 2010 and 2010 to 2015

土地类型	1990—2010年（×10^4 km^2）		2010—2015年（×10^4 km^2）	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定
轻度沙化土地	0.37	0.44	0.40	0.57
中度沙化土地	1.10	0.41	1.37	0.49
重度沙化土地	1.37	1.76	0.35	2.15
沙漠	8.46	0.09	9.43	0.79
其他类型	27.87	3.03	25.78	3.55

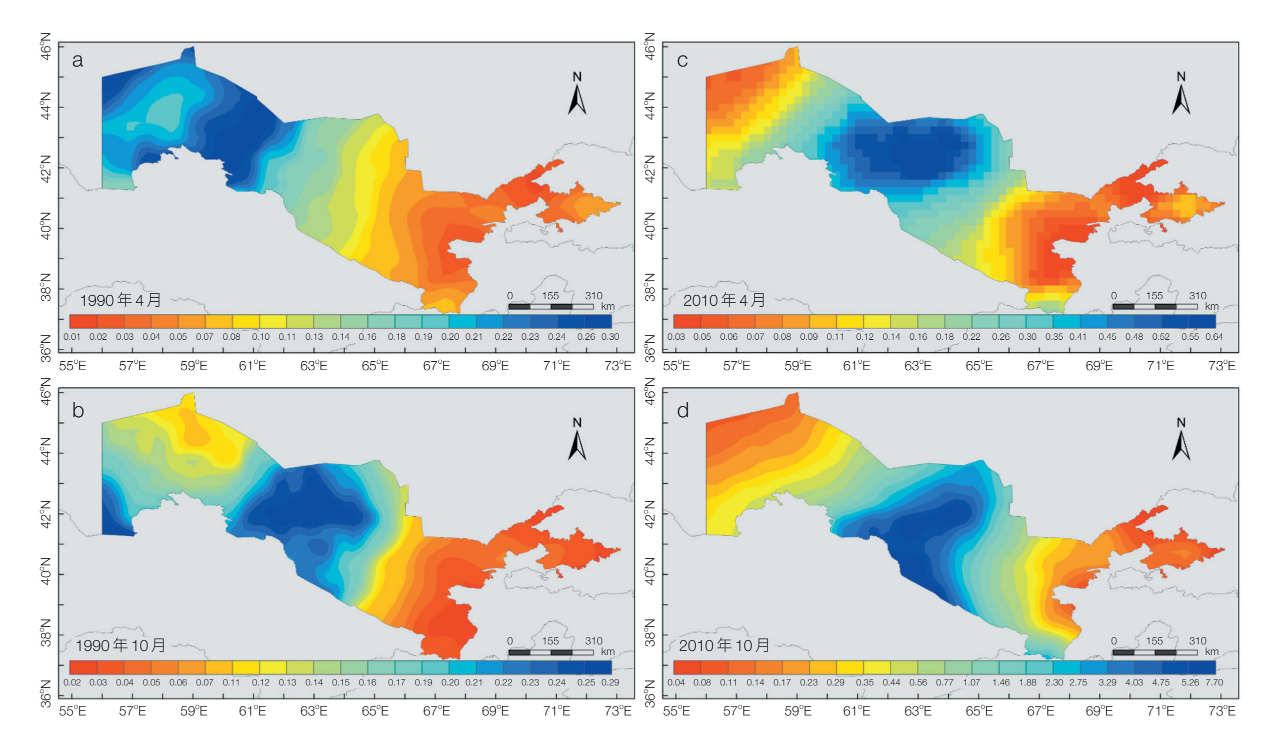


图 6　乌兹别克斯坦植被承载力时空分布图

Figure 6　Distribution map of vegetation carrying capacity in Uzbekistan

（a）1990 年 4 月；（b）1990 年 10 月；（c）2010 年 4 月；（d）2010 年 10 月

(a) April 1990; (b) October 1990; (c) April 2010; (d) October 2010

域总体 *ET*/*P* 较小（范围在 0.02—0.30），可以广泛开展灌+草+隐花植物的种植；但随着近年来咸海生态危机及干旱加剧，2010 年 4 月 *ET*/*P* 值（范围在 0.03—0.64）较 1990 年 4 月升高。因此，阿姆河流域（尤其是中游地区）不宜再进行大面积以灌木为主的植被建设，最好以草本+隐花植物为主。

3 咸海流域土地荒漠化防控的意义与发展机遇

3.1 跨地区生态保护的意义

良好的生态环境是“绿色丝绸之路”发展繁荣的自然载体和支撑；咸海干涸、植被锐减，以及土地沙化、盐渍化和盐尘的科学防控与生态恢复是咸海流域

良好发展的组成部分和目标之一。随着近年来“绿色丝绸之路”的向西延伸，“绿水青山就是金山银山”理念勾勒下的“绿色丝绸之路”建设对咸海流域的生态保护、生态安全和生态文明建设提出了新的要求。当前，土地荒漠化不仅影响了中亚地区30%—60%的灌溉耕地，还限制了中亚地区丰富的油气资源和可再生能源的开发利用，并对太阳能电池组、风力发电机组、油气管线造成风沙破坏，这极大地制约了当地经济的发展，限制了中亚“绿色丝绸之路”枢纽功能的发挥[23]。统筹解决好咸海流域的土地退化、水资源利用效率低、人口增加、产业落后与结构不合理等问题和矛盾，均衡生态保护与可持续发展的关系，将有助于打破中亚地区发展“瓶颈”，营造中亚地区繁荣稳定的发展局面。此外，“绿色丝绸之路”的建设，既可以为中亚经济发展、灾害防控提供中国智慧和中国方案[24]，又可在国际社会内凝聚共识、形成合力，提高国际社会应对全球性风险灾害的防控能力，这对于实现中亚地区的社会-经济-自然复合生态系统的可持续发展具有重要意义。

3.2 绿色高质量发展的机遇

自1991年10月在塔什干签署《中亚各共和国和哈萨克斯坦水利经济组织领导人宣言》（《塔什干宣言》）起，咸海生态问题开始上升至国际层面；1993年1月，国际拯救咸海基金组织正式成立，并于同年在克孜勒奥尔达峰会上通过了《关于解决咸海及其周边地带改善环境并保障咸海地区社会经济发展联合行动的协议》；2008年国际拯救咸海基金组织在联合国大会获得观察员席位；2016年习近平主席在乌兹别克斯坦最高会议立法院发表演讲时指出，要着力深化环保合作，践行绿色发展理念，加大生态环境保护力度，携手打造“绿色丝绸之路”。国际社会对咸海生态问题的关注逐步加强，为妥善解决咸海流域的土地荒漠化问题提供了良好的机遇。

4 咸海流域荒漠化防控的框架思路

咸海流域荒漠化土地的治理要在联合国2030年可持续发展目标的框架下，权衡社会、经济和自然系统之间的利益与矛盾，遵循绿色发展和生态文明建设的理念。通过提高用水效率、优化灌溉制度、调整产业结构，实现咸海流域生态保护与高质量发展。同时，还要遵循地理单元完整性、防治策略一致性、可持续发展原则，自上而下地提出和落实咸海干涸湖盆生态环境综合治理区划方案。

（1）*平台建设：咸海流域荒漠化监测大数据云平台和决策支持系统。*咸海流域土地荒漠化问题的剖析和解决对策要建立在多源（如自然、社会、经济等）、多尺度（如种群、群落、生态系统、景观、区域等）、多要素（如水、土、气、生，以及社会经济要素等）和多过程（如生态、水文、养分循环、能量循环等）大数据云平台的基础上[25]。流域尺度的土地荒漠化监测和灾害风险预警网络是基础：通过对咸海流域进行充分的本底调查，宏观上掌握沙化、盐渍化和盐尘土地发展趋势及其驱动要素，确定生态保护、资源配置、方法导向的着力点；以“生态优先，绿色发展”为导向，对影响土地荒漠化的水、土、气、生等关键要素进行较为全面的刻画，充分发掘咸海流域自然本底的生态恢复潜力。结合遥感数据、长期气象水文观测数据、流域水资源利用和社会经济发展数据、情景模拟的模型对比等，整合人工智能数据挖掘技术、计算机数值模拟分析大数据资源，建立咸海流域土地荒漠化防控的决策支持系统（图7）。

（2）*顶层设计：咸海流域综合治理方案。*基于对咸海干涸、沙化、盐渍化土地时空分布格局的分析，遵守因地制宜、因害设防、适地适树（灌草）、水量平衡、兼顾人工植被结构和功能的综合恢复等原则，通过高分辨率遥感影像和地面调查相结合，综合分析

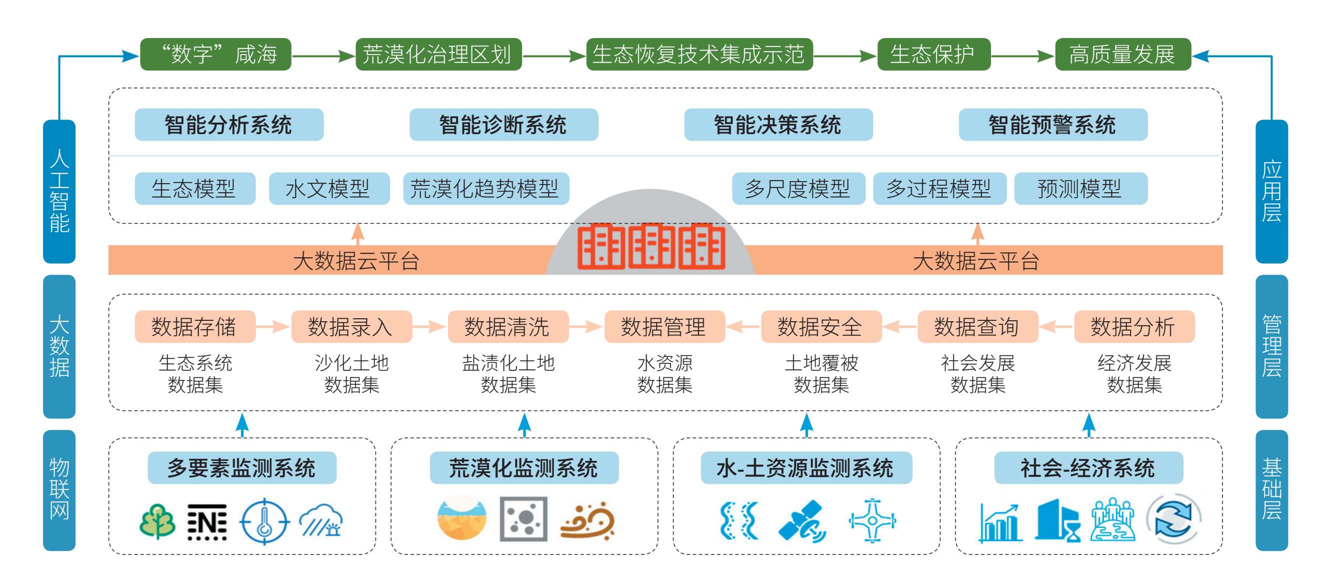


图 7　咸海流域荒漠化监测大数据云平台和决策支持系统（概念性框架）
Figure 7　Big Data Platform and Decision Support System of desertification monitoring in Aral Sea region (conceptual framework)

地形地貌、土地覆被、植被覆盖、土地荒漠化程度等要素，构建咸海荒漠化防治综合治理方案。

（3）防控措施：沙化和盐渍化土地植被恢复重建技术集成与示范。咸海流域的沙化和盐渍化问题引起的植被退化与水资源承载力、人类活动、气候变化等要素密切相关。生态恢复对策针对沙化和盐渍化的程度、驱动要素的差异，从植被地理、生态恢复、土壤改良，以及水资源的合理配置与高效利用等角度，建立沙化和盐渍化土地植被恢复重建试验观测平台，并从适宜沙旱生、盐生植物种质资源筛选、植物群落重建、植物多样性及其功能恢复等出发，开展植被恢复重建关键技术的研发；通过生态学对比试验综合分析，凝练成组配套、高效环保的沙化和盐碱化生态恢复技术体系。依托中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”和中-乌科研机构国际合作，在乌兹别克斯坦的布哈拉州和阿姆河三角洲穆伊纳克分别建立沙化和盐渍化土地植被恢复重建试验示范区，以期在试验、监测、技术集成和示范推广等方面为解决咸海生态危机的荒漠化问题提供思路和借鉴。

5 结语

咸海生态危机无疑是人类违反自然规律、“涸泽而渔”造成的地区乃至全球性的生态灾难。我国西北地区和中亚国家同处于北半球中纬度干旱带和欧亚大陆腹地，在生态环境、资源禀赋、社会人文等方面具有诸多相似性。虽然我国在内陆河水资源的合理利用和流域管理方面也曾经走过弯路，但在推进生态文明建设和可持续发展的道路上这些问题已得到很好解决。我国在过去几十年积累的经验模式可为咸海生态危机提供有益的借鉴。

咸海生态危机是“绿色丝绸之路”建设过程中荒漠化土地问题的典型代表和缩影。中国在防沙治沙和生态治理方面已有成熟的理论和技术，构建起了荒漠化防治技术推广应用模式，可以实现荒漠化快速高效治理技术成果在咸海地区的转化，这些都可为“绿色丝绸之路”沿线国家和地区荒漠化治理提供中国方案和中国智慧，从而助力解决咸海生态危机及荒漠化问题，服务中亚-西亚地区廊道安全和基础设施建设，为实现“绿色丝绸之路”的生态目标提供技术支撑与示范样板。

参考文献

1 United Nations. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. (2015-09-25)[2021-01-21]. https://sdgs.un.org/2030agenda.

2 张晓松, 安蓓. 习近平在推进“一带一路”建设工作座谈会上强调 总结经验 坚定信心 扎实推进 让“一带一路”建设造福沿线各国人民. 人民日报, 2016-08-18(01).

3 中华人民共和国外交部. 中国落实2030年可持续发展议程进展报告（2019）. (2019-09-24)[2021-01-21]. http://infogate.fmprc.gov.cn/web/ziliao_674904/zt_674979/dnzt_674981/qtzt/2030kcxfzyc_686343/P020190924779471821881.pdf.

4 刘卫东. 共建绿色丝绸之路：资源环境基础与社会经济背景. 北京: 商务印书馆, 2019.

5 Wang X X, Chen Y N, Li Z, et al. The impact of climate change and human activities on the Aral Sea Basin over the past 50 years. Atmospheric Research, 2020, 245: 105-125.

6 Micklin P. The Aral Sea disaster. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35(1): 47-72.

7 Micklin P. The future Aral Sea: Hope and despair. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 844.

8 Xu H Y. The study on eco-environmental issue of Aral Sea from the perspective of sustainable development of Silk Road Economic Belt. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2017, 57(1): 012060.

9 Loodin N. Aral Sea: An environmental disaster in twentieth century in Central Asia. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 6(4): 2495-2503.

10 Deliry S I, Avdan Z Y, Do N T, et al. Assessment of human-induced environmental disaster in the Aral Sea using Landsat satellite images. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(20): 471.

11 Lobanova A, Didovets I, Menz C, et al. Rapid assessment of climate risks for irrigated agriculture in two river basins in the Aral Sea Basin. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106381.

12 Li Q, Li X, Ran Y, et al. Investigate the relationships between the Aral Sea shrinkage and the expansion of cropland and reservoir in its drainage basins between 2000 and 2020. International Journal of Digital Earth, 2020, doi: 10.1080/17538947.2020.1865466.

13 Jin Q, Wei J, Yang Z L, et al. Irrigation-induced environmental changes around the Aral Sea: An integrated view from multiple satellite observations. Remote Sens Basel, 2017, 9(9): 900.

14 杨立信. 水利工程与生态环境（一）——咸海流域实例分析. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.

15 Aladin N V, Plotnikov I S, Micklin P, et al. Aral Sea: Water level, salinity and long-term changes in biological communities of an endangered ecosystem-past, present and future. Natural Resources and Environmental Issues, 2009, 15(1): 36.

16 Crighton E J , Elliott S J , Meer J V D, et al. Impacts of an environmental disaster on psychosocial health and well-being in Karakalpakstan. Social Science & Medicine, 2003, 56(3): 551-567.

17 刘东伟, 伊塔娜, 王立新, 等. 干旱区盐碱尘暴的形成、输送及其环境效应. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 104-108.

18 Indoitu R, Kozhoridze G, Batyrbaeva M, et al. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea. Aeolian Research, 2015, 17: 101-115.

19 Zhang X X, Claiborn C, Lei J Q, et al. Aeolian dust in Central Asia: Spatial distribution and temporal variability. Atmospheric Environment, 2020, 238: 117734.

20 Issanova G, Abuduwaili J, Galayeva O, et al. Aeolian transportation of sand and dust in the Aral Sea region. International Journal of Environmental Science & Technology, 2015, 12(10): 3213-3224.

21 Orlovsky N, Orlovsky L, 杨有林, 等. 20世纪60年代以来中

亚地区的盐尘暴. 中国沙漠, 2003, 23(1): 18-27.

22 Micklin P. The Aral Sea disaster. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35(1): 47-72.

23 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复：腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. 中国科学：生命科学, 2014, 44(3): 257-266.

24 徐海燕. 咸海治理：丝绸之路经济带建设的契入点?. 国际问题研究, 2014, (4): 83-93.

25 卢琦, 雷加强, 李晓松, 等. 大国治沙：中国方案与全球范式. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 655-664.

26 于贵瑞, 何洪林, 周玉科. 大数据背景下生态系统观测与研究. 中国科学院院刊, 2018, 33(8): 832-837.

Ecological Restoration and Countmeasures against Desertification Crisis in Aral Sea Region

HE Mingzhu[1] GAO Xin[2*] ZHAO Zhenyong[2] YANG Haotian[1] HUANG Lei[1] LI Xinrong[1] LEI Jiaqiang[2]

（1 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China）

Abstract Land degradation and desertification are the serious ecological problems and challenges to achieve global sustainable development goals. The Chinese government proposes to integrate the construction of the Silk Road Economic Belt with the environmental improvement of the Central Asia, to build an intimate community of shared destiny between China and the Central Asia countries, and to promote the green and sustainable development of the Silk Road Economic Belt. However, the ecological crisis in the Aral Sea causes a significant shrinking in water body, loss of biodiversity, salinization, desertification, and salt dust storm, which have become major environmental problems encountered in the construction of the Silk Road Economic Belt in the Central Asia. On the basis of sorting out the problems of land degradation and desertification caused by the ecological crisis in the Aral Sea, this study scientifically analyzed the development trend and causes of desertification and salinization land in the Aral Sea region in the past 30 years, discussed the spatial differences of vegetation stability and its carrying capacity in the Amu Darya Basin and the Aral Sea region, and put forward the directions, strategies, key technologies and innovative modes of ecological restoration for the desertification and salinized land. Solving the ecological crisis and desertification in the Aral Sea is one of the key points in the construction of the Green Silk Road, and also an important embodiment of building a community of shared future for mankind and practicing the global values of ecological civilization.

Keywords Aral Sea, desertification, sustainable development, salinization, salt dust, vegetation carrying capacity

*Corresponding author



何明珠 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员、博士生导师。中国科学院青年创新促进会会员。主要从事干旱区植被重建与恢复、荒漠植物生态化学计量方面的研究。主持或参加完成科研项目20余项。获国家科技进步奖二等奖1项，宁夏回族自治区科技进步奖一等奖2项，宁夏回族自治区青年科技奖1项。发表研究论文80余篇，其中在*New Phytologist*、*Soil Biology & Biochemistry*、*Plant and Soil*等植物及土壤学主流SCI期刊上发表论文20余篇。E-mail: hmzecology@lzb.ac.cn

HE Mingzhu Professor and Ph.D. Supervisor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS), and member of Youth Innovation Promotion Association, CAS. His main research areas include: vegetation reconstruction and restoration in arid areas; ecological stoichiometry of desert flora. He has presided over or participated in more than 20 scientific research projects and won one Second Prize of the National Science and Technology Progress Award, two First Prizes of Science and Technology Progress Award of Ningxia Hui Autonomous Region, and Youth Sci-Tech Awards of Ningxia Hui Autonomous Region. He has publised more than 80 papers in peer reviewed journals, such as *New Phytologist*, *Soil Biology & Biochemistry,* and *Plant and Soil*. E-mail: hmzecology@lzb.ac.cn



高 鑫 中国科学院新疆生态与地理研究所研究员，国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心副主任。主要研究领域为风沙地貌与防沙治沙工程。2016年入选新疆自治区引进高层次人才天池计划-“全职创新人才”。在*Geology*、*Journal of Geophysical Research*、*Geophysical Research Letters*等期刊发表学术文章20余篇，主持中国科学院战略性先导科技专项（A类）子课题、中国科学院“一带一路”专项、国家自然科学基金、省部级课题等多项。E-mail: gaoxin@ms.xjb.ac.cn

GAO Xin Professor of Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (CAS), Deputy Director of National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction. His main research fields are aeolian geomorphology and sand prevention and control. He graduated in Environment and Earth Sciences from Institut de Physique du Globe de Paris. He was selected as the “Full-time Innovative Talents” in Tianchi Program of Xinjiang Autonomous Region in 2016 and the National Key Project Talents Program in 2017. He has published more than 20 papers in *Geology*, *Journal of Geophysical Research*, *Geophysical Research Letters*, etc., and sponsored by the National Natural Science Foundation of China (NSFC), Strategy Priority Research Program of CAS, China-initiated “Belt and Road Special Project”, Provincial and Ministry Programs, etc. E-mail: gaoxin@ms.xjb.ac.cn

■责任编辑：张帆